

# Interlimb Coordination Mechanism Underlying High-Speed Quadrupedal Locomotion

著者	福原 洸
number	62
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5464号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00124784">http://hdl.handle.net/10097/00124784</a>

氏 名	ふく はら あきら
授 与 学 位	福 原 洸 博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成30年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気エネルギーシステム専攻
学 位 論 文 題 目	Interlimb Coordination Mechanism Underlying High-Speed Quadrupedal Locomotion (四脚動物の高速ロコモーションに 内在する脚間協調メカニズムに関する研究)
指 導 教 員	東北大学教授 石黒 章夫
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 石黒 章夫 東北大学教授 吉澤 誠 東北大学教授 篠原 歩 東北大学准教授 加納 剛史

## 論 文 内 容 要 旨

Quadrupeds exhibit versatile gait patterns in response to locomotion speed, their morphology, and the environment. For example, dogs change their gait patterns from walking to trotting to galloping as locomotion speed increases. These gait patterns are generated by the coordination between limbs, that is, interlimb coordination. By changing interlimb coordination, quadrupeds achieve a low cost of transport over a wide range of speeds. While quadrupeds have a large diversity in their morphology, different species have similar gait patterns. These facts suggest that there is some common principle to generate flexible locomotive patterns. Understanding the underlying control mechanism of interlimb coordination is essential to establish a design principle for legged robots that can adaptively generate energy-efficient locomotive patterns.

Biological findings suggest that adaptive interlimb coordination is partially generated by decentralized control mechanisms, i.e., central pattern generators (CPG) and reflexes, i.e., sensory feedback. For instance, decerebrated cats could exhibit spontaneous gait transitions from walking to trotting to galloping as locomotion speed increased, even though the higher brain was removed. Based on these biological findings, various CPG models have been proposed. While wired CPG models design interlimb coordination using neural communication between the limbs, non-wired CPG models enable the robot to generate various gait patterns in response to morphology and locomotion speed even though there is no preprogrammed neural connection between the limbs. These results suggest that physical communication is essential for generating adaptive locomotive patterns for quadrupedal locomotion. Although the previous non-wired CPG model has

succeeded in reproducing bounding gait, in which the left and right limbs move synchronously, the galloping gait, in which the left and right limbs coordinate asymmetrically, has not been well-reproduced. Because almost all cursorial quadrupeds likely use the asymmetrical gait patterns, something is missing in understanding the essential control mechanism of interlimb coordination underlying high-speed quadrupedal locomotion.

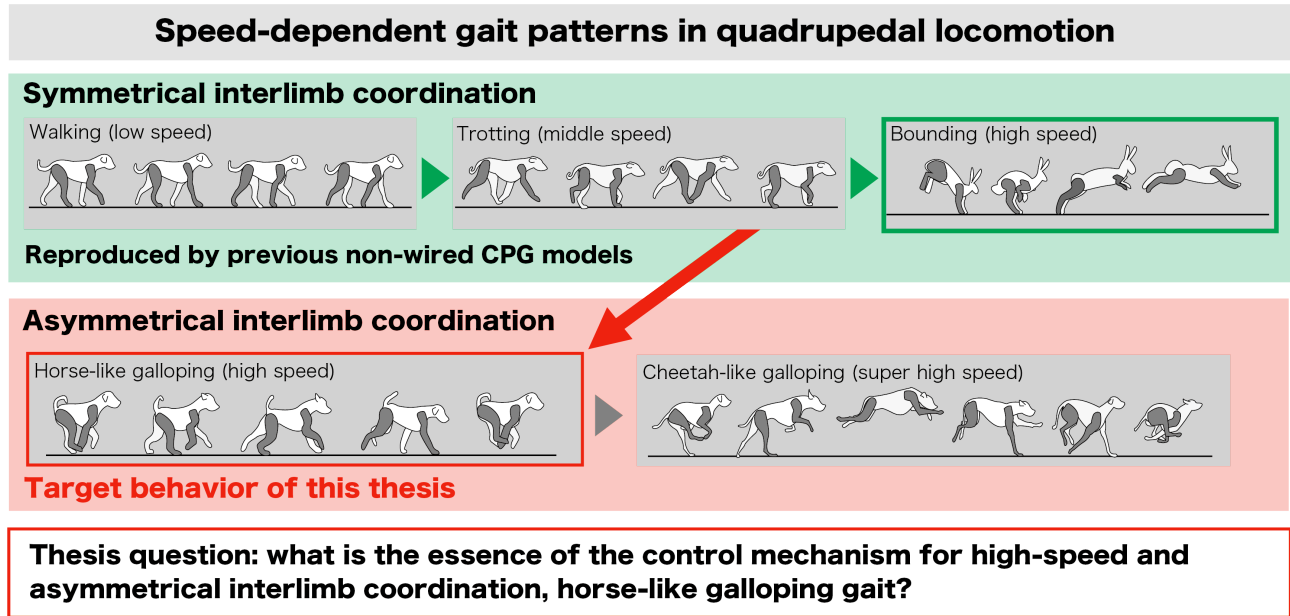


Fig. 1: Target behavior and thesis question.

To address the above issue, we reconsider the interlimb coordination mechanism (Fig. 1). In legged locomotion, limbs are required not only to support the body weight, but also to move the body forward, that is, to provide body support and propulsion. Quadrupeds are clever to utilize various gait patterns and realize simultaneously these roles over various speed ranges. In order to reproduce the high-speed gaits, not only body support roles but also propulsion roles are essential. Based on these ideas, in this thesis, we design a simple interlimb coordination mechanism from the viewpoint of "Tegotae". Tegotae is a Japanese concept describing how well a perceived reaction from the environment matches an expectation of the controller. Although a design principle for decentralized control scheme has not been established, owing to this concept, we can systematically formulate the local sensory feedback rules, which use the vertical and horizontal components of the ground reaction force (GRF) to modulate the phase of the controller (Fig. 2).

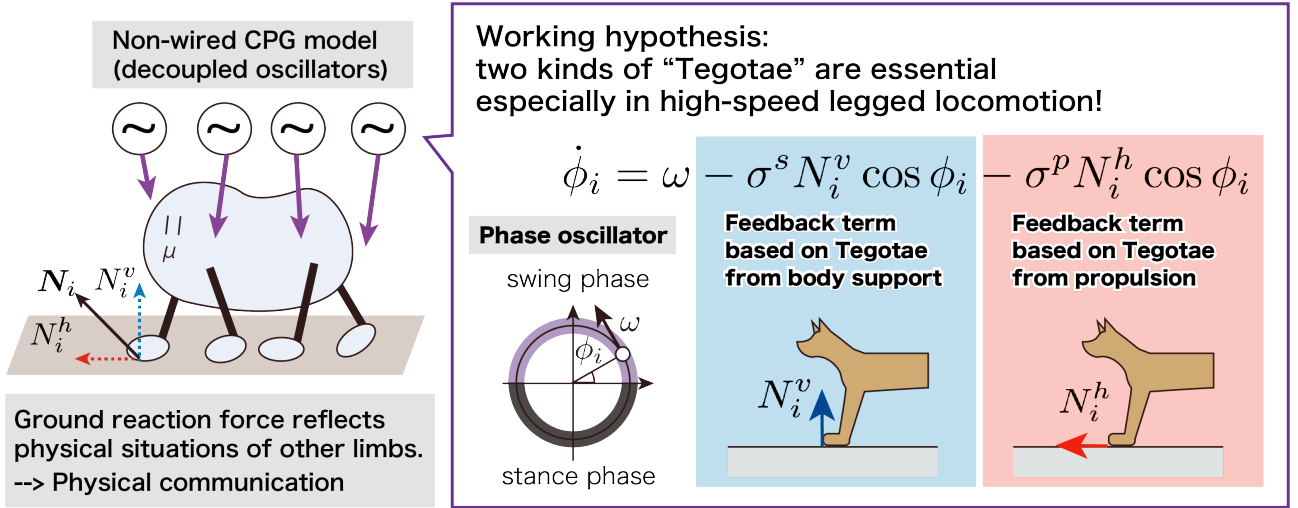


Fig. 2: Proposed interlimb coordination mechanism focusing on body support and propulsion.

In order to verify the proposed model, we conducted 2D simulation experiments and 3D hardware experiments using a developed quadruped robot (Fig. 3). The simulation results show that the robot exhibits spontaneous gait transition to galloping via the feedback based on Tegotae from both body support and propulsion while the bounding gait emerges via the feedback based on Tegotae from only body support. In hardware experiments, the robot also spontaneously exhibits galloping gait, which is faster and more energy-efficient than the emerged bounding gait. The results in 3D hardware experiments also suggest that 3D physical interaction between the limbs helps the robot to break the symmetry between the left and right limbs at lower locomotion frequency comparing to the 2D simulation environment.

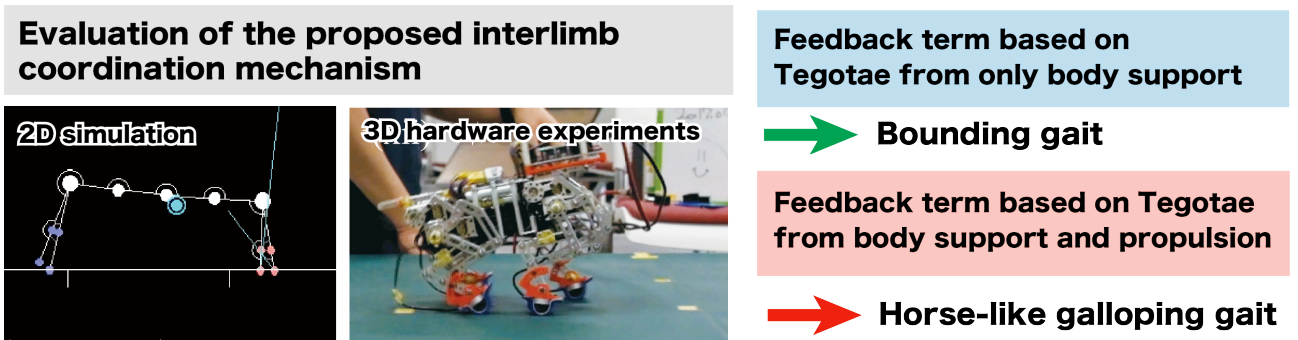


Fig. 3: Two different high-speed gaits emerge depending on the balance between feedback terms.

Results of the evaluations show that different roles between the limbs are essential for reproducing interlimb coordination during the galloping gait. The feedback from body support promotes gait transition at

higher locomotion speeds, but it affects the synchronization of the left and right limbs. However, the feedback for propulsion promotes the different roles between the limbs, resulting in deviation of the horizontal component of GRF between the left and right limbs. In fact, galloping quadrupeds exhibit all of the limbs contributing to the motion of the whole body in different ways: trailing hindlimb generates more propulsive force while leading forelimb generates more braking force. The essence of the proposed model is that each limb can behave different roles (e.g., generating more propulsion or braking force) via the feedback term based on the horizontal component of GRF. The proposed model reproduces these behaviors during the galloping gait, suggesting that local sensory feedback based on the horizontal component is essential for the interlimb coordination mechanism underlying high-speed quadrupedal locomotion.

# 論文審査結果の要旨

四脚動物は、移動速度や身体的特徴に応じて足並み（歩容）を変化させることで、幅広い速度領域において効率的な移動様式を実現している。驚くべきことに、適応的な歩容の変化（歩容遷移）は、大脳を外科的に切除された除脳ネコでさえも発現することが知られている。この生物学的知見から、脚の間の協調運動（脚間協調運動）は、大脳などの上位の脳神経系によって中央集権的に制御されているのではなく、脊髄内に存在する神経回路網（central pattern generator: CPG）や反射メカニズムによって自律分散的に制御されていることが示唆される。こうした生物学的知見を基にこれまで様々な脚間協調制御則が提案されてきたが、四脚動物が示す適応的な歩容生成メカニズムの解明には至っていない。特に、高速領域の歩容においては、bound と呼ばれる左右の脚が同期した歩容のみが再現されるにとどまっている。ウサギなどの限られた小動物のみが bound を発現する一方で、ウマやイヌなどの走行を得意とする多くの動物は、左右の脚をスキップのように非対称的に協調させる gallop と呼ばれる歩容を発現する。著者は、gallop への自発的な歩容遷移メカニズムの理解なくしては、四脚動物が示す適応的な脚間協調運動に通底する制御原理の抽出は成し得ないと考えた。そこで、脚間の力学的相互作用に着目することで、gallop への自発的な歩容遷移を可能とする脚間協調制御則のミニマルモデルの構築を試みた。この試みは、四脚動物に内在する自律分散的な制御メカニズムの理解のみならず、実世界を生物のようにしなやかに動き回るロボットの制御原理を確立するための基盤となることが期待される。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、gallop の再現において、「身体支持」と「推進」という脚の基本的な2つの役割の重要性を示し、脚間協調制御則を設計している。具体的には、「手応え」という新規な概念に基づき身体支持と身体推進の両者を考慮した局所センサフィードバック則を提案している。

第3章では、第2章で構築した制御則の妥当性を2次元シミュレーションにて検証している。実験結果から、従来研究で提唱されていた身体支持に関するフィードバック則だけではロボットは bound へ歩容遷移するが、身体支持と推進の双方のフィードバック則が作用すると、ロボットは gallop へと歩容遷移することが明らかになった。

第4章では、実世界環境下における提案制御則の妥当性を検証するために、四脚ロボット実機を設計・製作し、歩容遷移実験を行なっている。実機実験を通して、身体推進に関するフィードバック則のゲインに応じてロボットの左右脚の運動の非対称性が強まり、移動速度・移動効率が向上することを定量的に明らかにした。力学的相互作用のみに基づくシンプルな脚間協調制御則によって gallop への自発的な歩容遷移を再現したのは、世界で初めての研究事例であり、注目に値する。

第5章では、構築した制御則を通して、四脚動物が示す bound と gallop の制御メカニズムの違いについて考察している。具体的には、身体推進に関するフィードバック則によって脚間の役割分担が自発的に生じ、非対称で高速な gallop が実現されていることを明らかにした。また、身体支持と推進のそれぞれのフィードバック則の効果と高速歩容における異なる振る舞いの関係を明らかにしている。これらの知見は、環境との力学的な相互作用を積極的に活用可能なロボットの制御原理の構築において有用である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、gallop への自発的な歩容遷移の再現を通して、四脚動物が示す高速ロコモーションに内在する脚間協調運動の制御メカニズムを力学的相互作用の観点から明らかにしたものである。これらの成果は、適応的かつ高速な移動を可能とする脚式ロボットの設計論の構築においてきわめて有用であり、ロボット工学の発展のみならず、生物の持つ優れた運動制御原理の理解の深化に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。